

文章编号: 1002-0446(2008)-05-0398-06

## 一种遥控潜水器控制系统的研究与应用

郭 威<sup>1,2</sup>, 崔胜国<sup>1</sup>, 赵 洋<sup>1</sup>, 王晓辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 介绍一种基于工业以太网通信技术及 Windows 平台构建的遥控潜水器控制系统. 将该控制系统应用于最新研制的遥控潜水器中, 其在通信能力、视频传输、控制性能、硬件的可扩展性、数据的存储与显示等多方面都比传统的控制系统具有明显的优势. 在水池中进行了试验, 验证了该控制系统及整个潜水器良好的运动功能和性能.

**关键词:** 遥控潜水器; 工业以太网; Windows 平台; 控制系统

中图分类号: TP242

文献标识码: B

## Research and Application of a Control System for Remotely Operated Vehicle

GUO Wei<sup>1,2</sup>, CUI Sheng-guo<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, WANG Xiao-hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A control system based on industrial Ethernet communication technology and Windows platform is presented for remotely operated vehicle (ROV). The control system is applied to a newly developed remotely operated vehicle, and it displays obvious advantages over the traditional control systems in communication ability, video transmission, control performance, hardware expansibility, data storage and display, etc. Experiment is made in water pool with the presented control system to validate the good motion functions and performances of the control system and the whole ROV.

**Keywords:** remotely operated vehicle (ROV); industrial Ethernet; Windows platform; control system

### 1 引言 (Introduction)

遥控潜水器 (Remotely Operated Vehicle) 简称 ROV, 是目前世界上使用最为广泛的潜水器, 在海洋工程和军事等领域发挥着重要的作用. 传统的 ROV 存在作业能力相对较低、机动性差、视频传输的路数和传输距离受到限制、人机交互能力和可扩展性差等诸多方面问题, 不能满足当今海洋、军事等相关行业或部门对 ROV 的需求. 随着用户需求的不断提高, 潜水器需要在作业深度、作业能力、运动特性以及人机交互等方面向大深度、强作业、多自由度、数字化和智能化方向发展, 在这种形式下, 就要对传统的控制系统进行更新换代, 以满足用户的需求.

电子、通信和计算机等各方面科技水平的进步为 ROV 控制系统的更新换代提供了强有力的技术保障. 工业以太网通信速率高, 性能稳定, 在工业控

制领域也得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>. 同时, 随着科学技术的日新月异, 计算机硬件的功能越来越强大, 速度越来越快, 使得 Windows 操作系统的稳定性和实时性都得到了很大提升; 同时, Windows 操作系统又因其友好的图形用户界面、强大的功能、庞大的硬件支持、数目众多的开发工具以及调试工具, 逐渐在工业控制领域得到了运用<sup>[2]</sup>. 本文以中国科学院沈阳自动化研究所最新研制的 ROV 为控制对象, 首次采用工业以太网技术和基于 Windows 平台构建的新型遥控潜水器控制系统, 并从控制系统组成、视频和数据传输、潜水器的运动控制、控制系统软件设计等几个方面来阐述整个控制系统, 最后通过水池试验来评测整个控制系统的控制性能. 从试验结果来看, 该控制系统运行稳定、可靠, 性能完全满足该 ROV 的设计指标, 值得一提的是基于工业以太网和 Windows 平台实现的实时运动控制, 也很好地完成了任务.

## 2 控制系统组成 (Structure of the control system)

整个 ROV 主要由水面控制台、水下中继器和潜水器三部分构成<sup>[3]</sup>。控制台与中继器之间主要通过绞车由铠缆连接，中继器与潜水器之间通过系缆连接，具体见图 1。控制台主要用来操作潜水器和中继器，并把视频、传感器等信息通过监视器和人机界面显示出来；铠缆是承重缆，承担着潜水器和中继器的重量，系缆为非承重缆，在水中接近零浮力；中继器通过铠缆把潜水器施放到某一作业水深，潜水器脱离中继器，通过控制中继器上的系缆绞车收放系缆，使潜水器具有一定的作业半径，同时不受较重的铠缆影响。

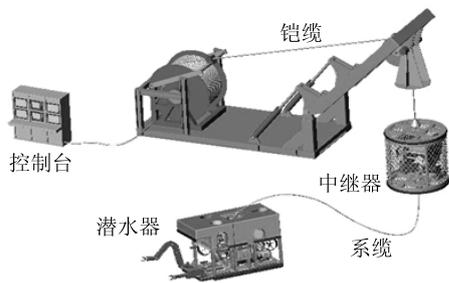


图 1 ROV 整体组成示意图  
Fig.1 Structure of the whole ROV

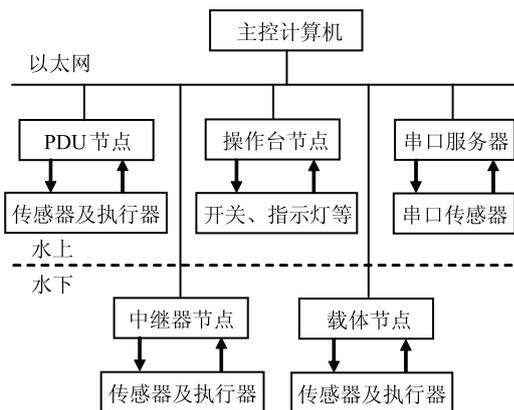


图 2 控制系统网络组成示意图  
Fig.2 The network structure of the control system

按物理位置分，控制系统主要由水上和水下两部分构成，见图 2。其中，水上部分有水面主控计算机节点、PDU 单元节点、操作控制台节点及串口服务器节点；水下主要由两部分构成，即中继器单元节点和潜水器单元节点。水面主控计算机节点主要负责整个遥控潜水器的控制及人机界面显示，是整个控制系统的核心；串口服务器节点主要用于将多

路串口转成以太网，这样主控计算机可通过网络采集串口数据；PDU 节点主要负责动力单元的控制以及电流、电压等的采集；操作控制台节点主要负责操作面板开关、旋钮和操纵单杆的动作采集以及指示灯的显示控制；中继器节点主要负责中继器部分传感器及执行机构的采集与控制；潜水器节点主要负责潜水器部分传感器及执行机构的采集与控制。所有节点都是通过工业以太网进行连接，水上部分与中继器的连网采用双绞线传以太网的方式，而水上部分与潜水器的连网采用光纤通信的方式，具体见下节。

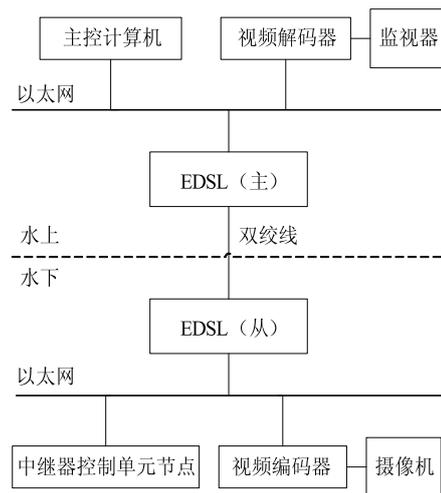


图 3 中继器通信传输方式  
Fig.3 The communication transmission of TMS

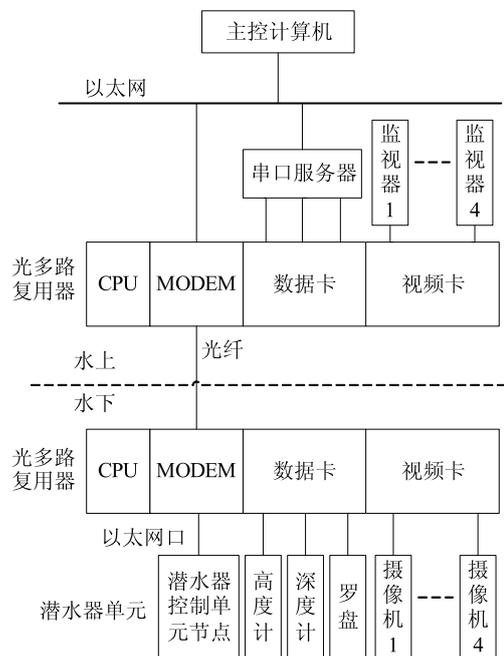


图 4 潜水器通信传输方式  
Fig.4 The communication transmission of vehicle

### 3 视频、数据传输 (Video and data transmission)

水下中继器 (Tether Management System, 简称 TMS) 上通常装有 1 台摄像机, 控制的点数较少, 交互的数据量较小, 因此水上与水下中继器控制单元的通信可采用双绞线以太网技术 (EDSL), 视频也采用以太网进行传输, 其传输的示意图如图 3 所示, 这样做可减少光纤数量的需求. 水下潜水器单元通常装有多台摄像机, 控制的点数也比较多, 距离也较远, 交互的数据量大, 因此水上单元与水下潜水器控制单元的通信与视频传输采用光多路复用器进行传输, 该设备为模块化设计, 光多路复用器由电源模块、MODEM 模块、数据卡模块和视频卡模块等多种类型的模块构成. 水上模块与水下各模块需成对使用. 水上和 underwater MODEM 模块用于将光纤连接起来, 模块上还带有一个以太网口, 这样水下潜水器的控制单元通过它与水面的以太网联网; 数据卡模块上带有 4 个 RS-232 或 RS-485 接口,

用于连接潜水器上具有标准串口输出的传感器或设备; 视频卡均有 4 个视频接口, 水下视频卡用于视频输入, 接到潜水器各个摄像机上, 水上卡用于视频输出, 接到水面控制机柜的各个监视器上. 这样视频、数据通过光纤在水面单元与潜水器之间进行传输, 其传输示意图如图 4 所示.

### 4 潜水器运动控制 (Motion control for vehicle)

#### 4.1 最小能耗推力分配矩阵

潜水器的运动控制主要是由布置在潜水器上的 7 台推进器完成的<sup>[4]</sup>, 其布置情况如图 5 所示 (俯视图). 水平方向的 4 台推进器呈平行四边形布置, 桨轴与主对称轴的夹角为  $\pm 45^\circ$ ; 垂直方向布置的 3 台推进器中, 前面两台左右对称且相互倾斜  $20^\circ$ , 后面一台居于主对称轴线上. 推进器的该种布置方案可以使潜水器产生 6 个自由度的运动, 即前进/后退、左移/右移、上浮/下潜、航向、纵倾和横摇, 用矩阵方程可表示如下:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & -\sin \alpha & -\sin \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \cos \beta & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -b \cos \beta & b \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c \cos \beta & -c \cos \beta & d \\ a & -a & a & -a & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别为潜水器各个自由度方向上的力,  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  分别为围绕各个对称轴旋转的力矩,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$ ,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为各推进器相对于潜水器各对称轴的力臂,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 、 $T_6$ 、 $T_7$  分别对应各个推进器的推力. 由于推进器是实现水下机器人运动控制的主要装置, 因此减少推进器的能耗对水下机器人控制系统来说也就变得越来越重要, 为此根据最优化控制理论, 构造目标函数:

$$E = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2 \quad (2)$$

使其取值最小. 根据极值理论, 求  $E$  关于  $T_1$  的导数, 并使其等于 0, 可得:

$$0 = 2T_1 + 2T_2T_2' + 2T_3T_3' + 2T_4T_4' \quad (3)$$

由式 (1) 可以得到:

$$T_2 = T_1 - \frac{B+C}{2} \quad (4)$$

$$T_3 = \frac{A+C}{2} - T_1 \quad (5)$$

$$T_4 = \frac{A+B}{2} - T_1 \quad (6)$$

其中,  $A = F_x / \cos \alpha$ ,  $B = F_y / \sin \alpha$ ,  $C = M_z / a$ , 将以上 3 式对  $T_1$  求导后代入 (3) 式并整理可得:

$$0 = T_1 + T_2 - T_3 - T_4 \quad (7)$$

将其与 (1) 式合并整理即可得最小能耗推力分配矩阵 (8), 并可从该矩阵方程求得推力分配的唯一解:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & -\sin \alpha & -\sin \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta & \cos \beta & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -b \cos \beta & b \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c \cos \beta & -c \cos \beta & d \\ a & -a & a & -a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (8)$$

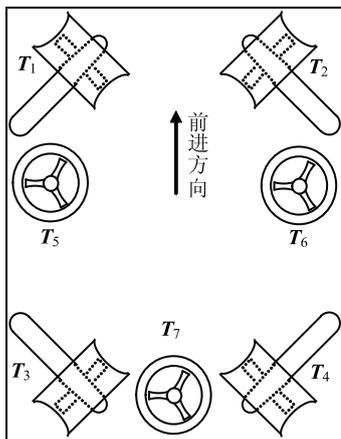


图 5 推进器布置图

Fig.5 Disposal of thrusters

### 4.2 速度控制

从式 (8) 可以看出, 潜水器具有 6 个自由度的运动能力, 即前进/后退、左移/右移、上浮/下潜、转向、横摇和纵倾运动. 潜水器的速度控制采用开环控制, 其结构图如图 6 所示.



图 6 潜水器速度控制结构框图

Fig.6 Structure of the vehicle velocity control

### 4.3 自动控制

潜水器的自动控制分为自动定向控制和自动定深、定高控制. 自动定向控制的作用是使潜水器在运动过程中, 保持给定的航向角, 其反馈量来自电子罗盘; 自动定深控制或自动定高控制的作用是使潜水器自动保持在给定的深度或高度, 二者在结构上是完全相同的, 不同之处在于反馈回路中使用的传感器不同, 自动定深回路以深度计做反馈元件, 而自动定高回路则以高度计做反馈元件, 两种回路不能同时使用. 同时, 为了实现潜水器的安全运动

控制, 当操纵杆的输入大于某值时, 会自动屏蔽掉相应自动控制回路控制器的输出. 自动控制结构框图如图 7 所示.

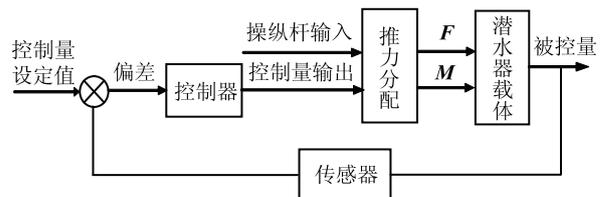


图 7 潜水器自动控制结构框图

Fig.7 The structure diagram of the vehicle automatic control

## 5 控制系统软件设计 (Software design of the control system)

本文的控制系统软件基于 Windows 平台、采用 Visual C++ 可视化开发工具开发而成. Visual C++ 是 Windows 环境下的一个面向对象、事件驱动的程序开发工具, 利用它开发遥控潜水器控制系统软件要比其它工具快捷得多 [5,6].

### 5.1 实时性分析及解决方案

综观该 ROV 控制系统体系结构, 按其对实时性的要求可以划分为三部分. (1) 逻辑控制, 该部分只要感觉不到明显的响应滞后就可以满足系统的正常工作要求, 实时性较低. (2) 运动控制, 该部分由于要完成载体的各种运动控制, 包括自动定向、自动定高、自动定深等闭环控制, 对实时性要求较高, 但由于该 ROV 具有大惯性、大滞后等特性, 控制周期相对较长, 所以 Windows 系统仍然可以胜任. (3) 数据采集, 绝大部分的数据采集周期相对较长, 200 ms 左右即可满足要求, Windows 足以胜任; 但是, 对于中继器系缆长度脉冲采样, 由于机械结构及传感器的缘故, 该部分需要程序完成脉冲的计数以及方向判断, 采样周期为毫秒级甚至是微秒级, 正常的 Windows 系统不能够胜任.

由于该 ROV 作业区域较大, 数据传输线路较长, 而且在线路上传输的数据中, 除了程序用到的输入输出数据外, 还有大量的视频信号数据, 网络传输繁忙, 造成数据传输的延迟较大; 同时, 所采用的通信协议为 UDP, 存在丢包现象, 有可能造成脉冲丢失. 因此, 无论采用什么措施, 在主控计算机这一端都不能很好地解决脉冲采样的实时性问题.

通过分析控制系统硬件构成可以知道, 现场 I/O 采集节点负责中继器系缆长度脉冲信号的采集, 而该 I/O 采集节点具有现场编程功能. 通过脉冲的计数器编程, 可把采集到的脉冲信号变为需要的长度数据, 并通过 MODBUS 协议经以太网通信, 把采集的数据传送至 Windows 平台. 可见, 经过此种方法, Windows 只需从 I/O 采集模块获得脉冲计数的结果值, 与脉冲则没有直接关系, 于是在无形中, 大大地削弱了中继器系缆长度脉冲采样的实时性, 使 Windows 系统也足以胜任.

### 5.2 控制系统软件设计

对于不同的水下机器人来说, 因为采用的传感器和完成的功能基本上相同, 所以只要采用 Windows 平台, 差异性就很小. 为此本软件按功能划分模块, 进行软件设计, 编程语言则尽量采用 C 语言, 这样既提高了控制软件的通用性, 又可方便移植到其它水下机器人上.

控制系统软件可分为控制子程序和人机界面子程序两大部分, 每一部分又可细分为多个模块. 控制子程序在后台实时运行, 主要完成设备通信驱动、数据的输入输出、逻辑以及运动控制、数据管理、数据存储记录等任务; 而人机界面子程序则在前台实时运行, 执行状态指示、参数设置与修改等任务, 是操作人员参考的重要部分<sup>[7]</sup>. 两大部分同时运行, 相互配合, 共同完成潜水器的控制. 软件的模块化结构如图 8 所示, 各模块主要完成的功能如下:

- (1) 通用通信程序接口: 为各个设备的输入、输出提供一个通用的以太网通信程序接口;
- (2) 输入输出程序: 负责数据的输入、提取、滤波、整合、输出等;
- (3) 数据管理器: 程序开辟的一块公共内存区, 各个模块使用的绝大部分数据都存放于此;
- (4) 逻辑控制: 完成面板操作到载体动作的各种映射, 此外还进行报警判断、故障保护等;
- (5) 运动控制: 主要完成载体的运动控制, 包括

自动控制算法等;

(6) 数据记录: 对重要的过程数据予以存储记录, 以便操作完成后进行分析;

(7) 人机界面: 负责状态数据的显示以及参数设置、更改等.

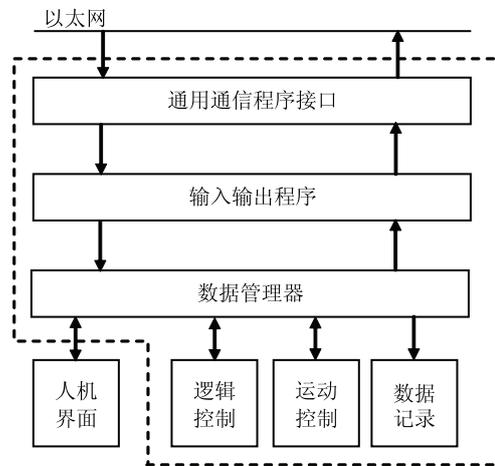


图 8 控制系统软件的模块化结构图

Fig.8 Modularized structure of the control system software

## 6 水池试验 (The experiment in water pool)

该控制系统在中国科学院沈阳自动化所最新研制的 ROV 中得到了应用, 并在水池中对 ROV 进行了功能和性能测试, 其在作业能力、视频与通信传输、数据存储与记录、人机界面、参数设置与更改、运动控制以及调试等多方面都比先前研制的 ROV 得到了大幅提高和改善, 特别是对实时性要求最高的运动控制. 其在水池中的调试效果如图 9、10 和 11 所示. 从图中可见曲线非常平滑, 完全达到了控制系统对实时性的要求, 且精度非常高.

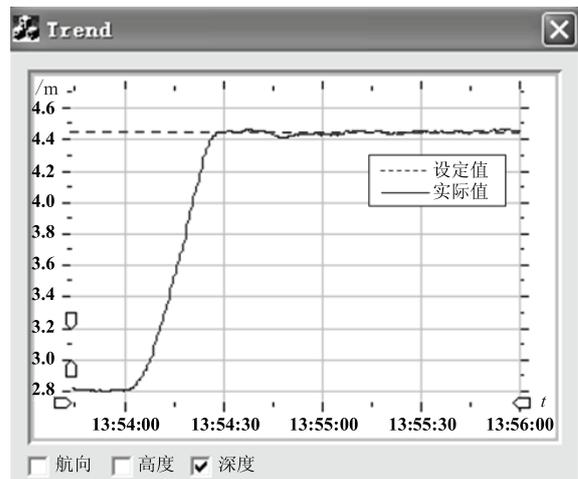


图 9 自动定深控制曲线

Fig.9 The control curve of auto depthkeeping

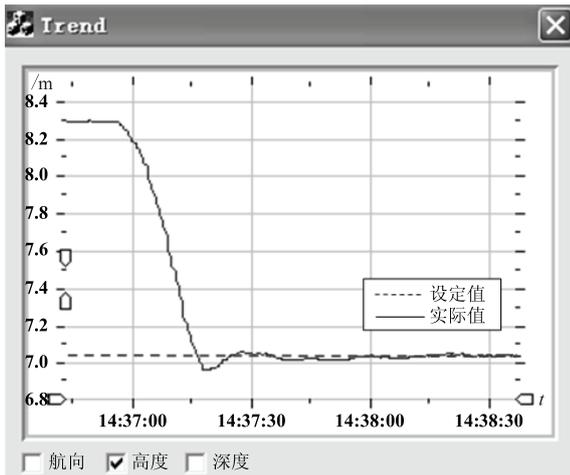


图10 定高自动控制曲线

Fig.10 The control curve of auto altitudekeeping

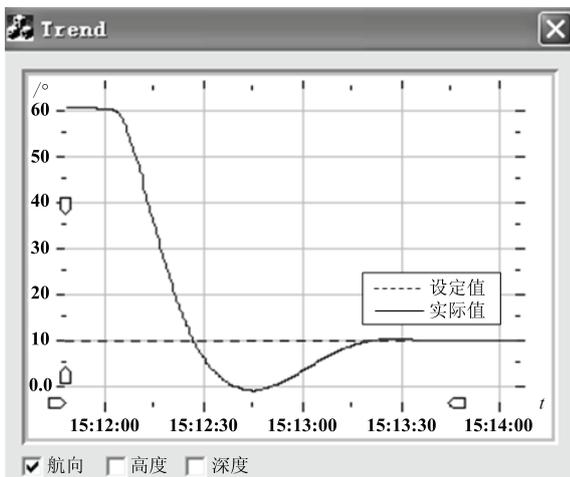


图11 定向自动控制曲线

Fig.11 The control curve of auto heading

## 7 结论 (Conclusion)

基于工业以太网通信技术以及功能强大的 Windows 平台,设计了遥控潜水器的控制系统,并实际应用于研制的 ROV 中.采用工业以太网技术,不仅大大提高了整个控制系统的可扩展性、通用性和灵活性,而且突破了以往困扰 ROV 的视频和数据传输方面的路数和距离瓶颈;Windows 及 Visual C++ 的采用,不仅使程序具有通用性,且针对不同的遥控潜水器,只需做简单的修改,就可以方便地移植绝大部分程序代码,既可提高系统的可靠性,又可缩

短项目的开发周期.实际应用结果表明,该控制系统运行稳定、可靠,完全满足潜水器设计指标,该控制系统可以方便地移植到其它类似的产品开发中.

## 参考文献 (References)

- [1] 冯冬芹, 金建祥, 褚健. Ethernet 与工业控制网络 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 23~26,35.  
Feng Dong-qin, Jin Jian-xiang, Chu Jian. Ethernet and industrial control network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(1): 23~26,35.
- [2] 赵吉宾, 刘伟军, 王越超. 基于 Windows 的快速成形实时控制系统 [J]. 计算机工程, 2003, 29(20): 148~150.  
Zhao Ji-bin, Liu Wei-jun, Wang Yue-chao. Real-time control system for rapid prototyping based on Windows[J]. Computer Engineering, 2003, 29(20): 148~150.
- [3] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.  
Jiang Xin-song, Feng Xi-sheng, Wang Li-tang. Unmanned Underwater Vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000.
- [4] 郭威, 王晓辉. 载人潜水器及其运动控制 [J]. 仪器仪表学报 (增刊), 2005, 26(z1): 824~826.  
Guo Wei, Wang Xiao-hui. Manned submarine and its motion control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(z1): 824~826.
- [5] 赛奎春. Visual C++ 工程应用与项目实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Sai Kui-chun. Visual C++ Engineering Application and Project Practice[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [6] 雷斌, 杨建华, 黄超, 等. Visual C++ 6.0 网络编程技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.  
Lei Bin, Yang Jian-hua, Huang Chao, et al. Visual C++ 6.0 Network Programming Technology[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2000.
- [7] 黄俊峰, 徐竟青, 李一平. 水下机器人实验平台软件系统 [J]. 计算机工程, 2003, 29(22): 175~177.  
Huang Jun-feng, Xu Jing-qing, Li Yi-ping. Software system of experiment platform for underwater robot[J]. Computer Engineering, 2003, 29(22): 175~177.

## 作者简介:

郭威 (1971-), 男, 硕士, 副研究员. 研究领域: 水下机器人控制及相关技术.

崔胜国 (1978-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 水下机器人控制及相关技术.

赵洋 (1976-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 水下机器人控制及相关技术.